

Опыт применения



От партнеров программы Natural Gas STAR

REDUCING METHANE EMISSIONS FROM COMPRESSOR ROD PACKING SYSTEMS

СОКРАЩЕНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ЧЕРЕЗ СИСТЕМЫ УПЛОТНЕНИЙ ШТОКА КОМПРЕССОРА

Аннотация

В газовой отрасли США используется более 29 000 поршневых компрессоров, в каждом из которых в среднем находится четыре цилиндра, что означает использование около 160 000 систем уплотнения поршневых штоков. Через эти системы ежегодно в атмосферу выбрасывается 43,8 млрд. фут.³ (1 226 млрд. м³) метана, что позволяет рассматривать их как один из основных источников эмиссии на компрессорных установках при добыче природного газа.

Все системы уплотнения в нормальных условиях дают утечку, объем которой зависит от давления в цилиндре, подгонки и регулировки уплотнительных элементов и степени износа колец и штока. Новая система уплотнения, правильно настроенная и подогнанная, может пропускать примерно 11-12 фут.³/ч (0,3-0,3 м³/ч). Однако по мере старения системы уровень утечки повышается из-за износа уплотнительных колец и поршневого штока. Один из партнеров программы Natural Gas STAR сообщил о регистрации уровня эмиссии в объеме 900 фут.³/ч (25,2 м³/ч) на одном компрессорном штоке.

С учетом финансовых задач предприятий и данных мониторинга партнеры программы могут определять уровни эмиссии, при которых замена колец и штоков становится экономически выгодной. Выгоды от оценки и последующего применения метода, определяющего "порог рентабельности замены", включают сокращение эмиссии метана и уменьшение затрат. При таком подходе партнер программы Natural Gas STAR экономит более \$100 000 в год. Метод определения "порога рентабельности замены" позволяет получить и производственные выгоды: продлевается срок эксплуатации существующего оборудования, увеличивается эффективность производства, сокращаются расходы в долгосрочной перспективе.

Место утечки	Годовой объем утечки газа, тыс. фут. ³ (тыс. м ³)	Метод сокращения утечки газа	Экономия газа, \$/год	Стоимость внедрения, \$/год	Срок окупаемости
Уплотнение штока компрессора	865/24,2 ¹	Экономически обоснованная замена колец и штоков	2,595 ²	400 ³	2 месяца

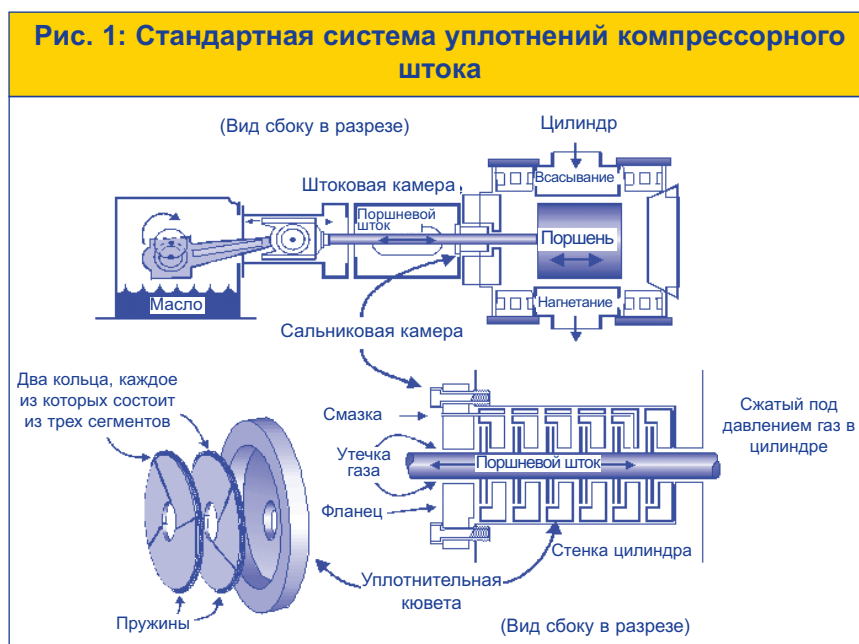
¹ Pipeline Research Committee International (1999).

² Цена газа \$3,00/тыс. фут.³ (\$106/ тыс. м³)

³ \$1 200 - дополнительные затраты при замене колец раз в три года вместо одного раза в четыре года (в среднем по отрасли).

Работа газовых поршневых компрессоров сопровождается утечками метана. Чаще всего это происходит через фланцы, клапаны и другие соединительные части компрессоров. Однако на системы штоковых уплотнений приходится наибольший объем потерь газа.

Системы сальников необходимы для предотвращения утечек газа высокого давления из рабочего цилиндра по штоку, при этом обеспечивается свободный ход самого штока. На рис. 1 показана стандартная система уплотнений компрессорного штока.



Штоковое уплотнение компрессора состоит из нескольких пар разрезных колец, хорошо подогнанных по штоку для создания газового затвора. Уплотнительные кольца смазываются циркулирующим маслом, которое снижает износ, увеличивает изоляцию и отводит тепло. Другие методы охлаждения включают кондиционирование воздуха, водяные рубашки и циркуляцию хладагента внутри камеры сальника. Уплотнительные кольца прижимаются к штоку круговыми пружинами и, как правило, располагаются попарно в уплотнительной ювете. Количество ювет и колец зависит от давления в компрессорном цилиндре. Опорное кольцо на задней стенке камеры сальника предотвращает утечки из уплотнительных ювет.

Новая система штоковых уплотнений при правильной установке на гладкий, хорошо отцентрированный шток может обеспечить минимальную утечку в объеме 11,5 фут.³/ч (0,3 м³/ч). Более высокий уровень утечек может быть связан с плохой подгонкой штока и уплотнительных элементов из-за их износа. Как правило, утечки возникают в четырех местах:

- ★ вокруг камеры сальника через опорное кольцо;
- ★ через уплотнительные юветы, которые обычно собираются одна за другой;

Экономические и экологические выгоды

- ★ через деформированные во время хода штока уплотнительные кольца;
- ★ между кольцами и штоком.

Просочившийся газ выпускается в атмосферу через отверстия во фланце. Регулярный контроль и своевременная замена уплотнительных колец может снизить утечки. Новые материалы и конструкции сальников могут значительно сократить эмиссию газа в будущем.

Регулярный мониторинг и замена сальников компрессора обеспечивают значительное сокращение эмиссии метана в атмосферу и экономят денежные средства. Например, бронзовые уплотнительные кольца изнашиваются и подлежат замене каждые три-пять лет. Однако по мере разрушения уплотнений, утечки могут достичь такого уровня, при котором более частая замена колец может стать экономически оправданной. Кроме того, более частая замена колец значительно продлевает срок эксплуатации штока компрессора.

Партнеры, работающие по программе мониторинга и экономически эффективной замены, могут добиться следующих результатов:

- ★ сокращения эмиссии метана;
- ★ экономии газа за счет сокращения утечек;
- ★ увеличенного срока эксплуатации компрессорного штока.

Предприятия могут определить график экономически эффективной замены, включающий пять этапов.

Этап 1: Наблюдение и регистрация основных утечек и износа поршневого штока. Определение базового уровня утечек и мониторинг износа поршневого штока позволяет партнерам Natural Gas STAR отслеживать увеличение потерь газа и оценивать экономический эффект от замены уплотнительных колец и штоков.

Вентиляционное отверстие на фланце камеры сальника позволяет просочившемуся газу улетучиваться в атмосферу. Газ также может проходить по штоку и/или через опорное кольцо сальника и таким образом попадать в штоковую камеру. Поэтому, по возможности, необходимо измерять утечки как из сальниковой камеры, так и из штоковой камеры. Некоторые системы отводят газ через штоковую камеру, другие имеют отдельные выходы.

Утечки газа могут измеряться как портативными, так и стационарными устройствами. Перед началом измерений необходимо проверить систему вентиляции. Если не учитывать утечки штоковой камеры, то общая эмиссия может быть недооценена на 40%, что может повлиять на расчет экономической эффективности.

Важно провести измерения сразу после установки новых уплотнительных элементов (или новых уплотнительных элементов и штоков). Эти измерения станут базовыми показателями для данного цилиндра и могут служить точкой отсчета для других цилиндров и компрессоров с аналогичными конструкциями, размерами,

Принятие решения

давлением и степенью износа штоков. После установки колец на протяжении всего срока их эксплуатации необходимо регулярно раз в месяц или квартал проводить мониторинг, регистрировать объемы утечек и соответствующие рабочие условия (давление, температуру, режим смазки) компрессора.

Штоки проверяются периодически во время замены колец, при этом фиксируются изменения износа штока в месте его контакта с уплотнительными кольцами. Поршневые штоки изнашиваются медленнее, чем уплотнительные кольца, и имеют срок службы около 10 лет. Плохо отцентрованные штоки истираются, теряя круглую форму, или превращаются в конус, что влияет на положение колец на штоке, скорость их износа (и таким образом, на плотность изоляции). Недостаточно круглый шток не только пропускает газ, но и неравномерно изнашивает уплотнения, что ведет к сокращению срока эксплуатации как штока, так и уплотнительных элементов. Утечка, связанная с износом штока, определяется как изменение базового значения утечки после каждой новой замены колец (при тех же условиях эксплуатации и типе колец). Увеличение начальных показателей утечек может использоваться для расчета экономически обоснованного срока замены поршневого штока (см. Этап 4).

Этап 2. Сравнение уровней текущих и исходных утечек и определение ожидаемого сокращения эмиссии. Используя данные, собранные на первом этапе, необходимо сравнить начальное значение утечек и их уровень в данный момент времени, определить необходимость замены уплотнения или штока. На рис. 2 показано, как происходит сравнение.

Пять этапов рентабельной замены уплотнений и поршневых штоков:

1. Наблюдение и регистрация основных утечек и износа поршневого штока.
2. Сравнение уровней исходных и текущих утечек и определение ожидаемого сокращения эмиссии.
3. Оценка стоимости замены.
4. Определение порога рентабельности замены.
5. Замена уплотнений и штоков по достижении порога рентабельности.

Рис. 2: Сравнение уровней текущих и исходных утечек

Дано:

IL = Исходный уровень утечек при последней замене уплотнительного кольца штока

CL = Текущий уровень утечек

LRE = Ожидаемое сокращение утечек

Расчет:

$$LRE = CL - IL$$

Например, если уровень утечек через сальник на данный момент 100 фут.³/ч (2,8 м³/ч), а после последней замены составлял - 11,5 фут.³/ч (0,32 м³/ч), то ожидаемое сокращение утечек составит:

$$LRE = 100 - 11,5 \text{ фут.}^3/\text{ч} \text{ (} 2,8 - 0,32 \text{ м}^3/\text{ч} \text{)}$$

$$LRE = 88,5 \text{ фут.}^3/\text{ч} \text{ (} 2,48 \text{ м}^3/\text{ч} \text{)}$$

Для точного анализа "ожидаемого сокращения утечек" (LRE) необходимо оценивать отдельно прибыль от замены уплотнительных колец и поршневых штоков. При определении LRE только вследствие замены новых колец следует предполагать, что весь прирост утечек с момента последней замены колец обусловлен их износом. При определении LRE путем замены колец и поршневого штока (отметим, что при замене штока всегда устанавливаются новые кольца) рекомендуется использовать начальное значение утечек, измеренное сразу после последней замены штока на данном компрессоре. При отсутствии статистических данных по рассматриваемому компрессору можно использовать данные другого подобного компрессора для установления базовых (начальных) значений.

Этап 3: Оценка стоимости замены. Стоимость замены уплотнительных колец и поршневых штоков различна для различных типов компрессоров. Чтобы заменить уплотнительные кольца, необходимо учитывать количество цилиндров компрессора и типы заменяемых колец. По данным одного из партнеров Natural Gas STAR, стоимость типового тефлонового или с включениями молибдена набора уплотнительных колец варьируется от \$100 до \$125 на кювету, при этом общая стоимость для 8-10 кювет сальника трехдюймового штока составит от \$800 до \$1 250. Другой источник утверждает, что сальниковые уплотнения обходятся от \$500 до \$800 или от \$1 500 до \$2 500, если сальник заменяется полностью. Такие факторы, как размеры и тип штока, влияют на стоимость замены штока. Стоимость штока может варьировать от \$1 800 до \$3 500. Специальные штоковые покрытия, такие, как керамика, с включениями карбида вольфрама или хрома, могут увеличить его стоимость на \$1 000 и выше. Стоимость некоторых штоков достигает \$9 000 - \$10 000.

Стоимость демонтажа также может варьироваться в зависимости от местонахождения и трудностей, возникающих в процессе замены. Как партнеры, так и производители приравнивают стоимость демонтажа оборудования к стоимости установки. По некоторым данным, один из партнеров потратил в среднем по \$1 050 на приобретение и установку одного набора уплотнительных колец. Партнеры считают, что затраты на мониторинг и измерение утечек по каждому сальнику несут незначительные затраты на фоне стоимости трудозатрат при замене колец и штоков.

Этап 4: Определение порога рентабельности замены. На основе информации, полученной на этапах 1 - 3, партнеры могут вычислить "порог рентабельности замены", при котором замена колец и штоков становится экономически целесообразной. Партнеры определили несколько методов расчета данного "порога" по критериям оценки инвестиций компании и специфическим характеристикам участка.

Простейшим способом расчета "порога рентабельности замены" является использование принципа дисконтированного поступления средств. Партнеры могут вычислять порог замены как для сальников, так и для штоков, используя следующее уравнение:

$$\text{Порог рентабельности замены} = \frac{CR * DF * 1\,000}{(H * GP)}, \text{ фут.}^3/\text{ч};$$

где

CR = Стоимость замены, \$;

DF = Коэффициент дисконтирования, %;

H = Количество часов работы компрессора в год;

GP = Цена газа, \$/тыс. фут.³

Коэффициент дисконтирования - это показатель, который используется для приведения экономических показателей к соответствующим размерам годового дохода и вычисляется по формуле:

$$DF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}.$$

Здесь *i* - ставка дисконтирования или уровень риска компании, выраженная в десятичных долях, а *n* соответствует выбранному периоду окупаемости. Используя данную формулу при ставке дисконтирования 10% (*i* = 0,10) и сроке окупаемости один год (*n* = 1), получаем коэффициент дисконтирования 1,10. При сроке окупаемости два года (*n* = 2) коэффициент дисконтирования равен 0,576 и т.д.

На рис. 3 приведена таблица дисконтированной окупаемости. По приведенным данным, можно оценить величину ожидаемого сокращения утечек (LRE), эквивалентную возврату вложений на один комплект уплотнительных колец за год, два года и т.д. Например, затраты в \$1 200 на замену комплекта уплотнительных колец окупятся за один год при сокращении 55 фут.³/ч (1,54 м³/ч) утечек, за два года - при сокращении утечек 29 фут.³/ч (0,81 м³/ч) и т.д. (при 10% дисконтировании). Таким образом, если партнер выбирает критерий окупаемости 2 года, то для него экономически выгодным будет замена колец при уровне утечек 29 фут.³/ч (0,81 м³/ч). Другими словами, когда ожидаемое сокращение утечек (LRE) от замены колец достигнет 29 фут.³/ч (0,81 м³/ч), партнеру следует заменить уплотнительные кольца.

Рис. 3: Порог рентабельности замены уплотнительных колец	
Ожидаемое сокращение утечек, фут. ³ /ч (м ³ /ч)	Период окупаемости ¹ , год
55 (1,55)	1
29 (0,81)	2
20 (0,56)	3
16 (0,44)	4
13 (0,36)	5

¹ Предполагаемая стоимость замены уплотнительных колец \$1 200 при цене газа \$3,/тыс. фут.³ (\$106 тыс. м³) и 8 000 рабочих часов в год.

Расчет порога рентабельности замены штока можно произвести аналогично варианту с кольцами, т.е. через определение требуемого объема сокращения утечек для покрытия затрат на установку нового штока. Алгоритм действий тот же, что описан выше, только в качестве CR выбираются капитальные затраты на замену штока.

Установив порог рентабельности замены, партнеры должны определить объем сокращения эмиссии метана, ожидаемого при такой замене. Измерение текущих утечек (CL) не позволяет определить, вызваны они износом колец или штока. Однако, со временем, значения исходного уровня (IL) после периодических замен колец будут постепенно возрастать за счет износа штока. Партнерам следует зафиксировать базовый уровень, по которому будет определяться уровень утечек за счет износа штока. Это может быть выполнено путем измерения утечки сразу после установки нового штока либо путем сравнения показателей для подобной установки, оснащенной новыми штоками и уплотнениями. Когда базовый уровень установлен, можно ввести коэффициент дисконтирования для определения уровня утечек по штоку и необходимости его замены.

Рис. 4 иллюстрирует способ, подобный представленному на рис. 3, вычисления порога рентабельности замены штоков и колец. В данном примере предполагается, что стоимость замены штока и сальника составляет \$8 200. Из таблицы видно, что для компании, предполагающей иметь срок окупаемости один год, требуется LRE = 376 фут.³/ч (10,53 м³/ч), в то время как компаниям, которых устраивает срок окупаемости три года, можно менять шток и уплотнения уже при LRE = 137 фут.³/ч (3,84 м³/ч), при этом ставка дисконтирования составляет 10%.

Рис. 4: Порог рентабельности замены штоков и колец

Ожидаемое сокращение утечек, фут. ³ /ч (м ³ /ч)	Период окупаемости ¹ , год
376 (10,53)	1
197 (5,52)	2
137 (3,84)	3
108 (3,02)	4
90 (2,52)	5

¹ Предполагаемая стоимость замены уплотнительных колец \$1 200, замены штока -\$7 000 при цене газа \$3,00/тыс. фут.³ (\$106/ тыс. м³) и 8 000 рабочих часах в год.

Примечание: высокий уровень утечек может быть также следствием неправильной центровки штока или плохой подгонки колец. В таком случае высокое значение LRE может означать необходимость переустановки колец и дополнительной центровки штока, а не его замену. Дополнительный осмотр геометрии штока (конус, овал, задиры и шероховатость) позволяет трактовать увеличение IL относительно базового уровня как рабочий износ штока.

Этап 5: Замена уплотнений и штоков по достижении порога рентабельности. Мониторинг эмиссии и замена уплотнений и штоков по достижении порога рентабельности очень быстро снизит эмиссию и затраты на топливо для компрессора. Партнерам нужно только сравнивать данные по компрессорной станции с установленной величиной "порога замены". Производить замену уплотнительных колец и штока следует при LRE равной или превышающей порог рентабельности замены. Желателен выбор значений "порога замены", максимально снижающих эмиссию метана.

Опыт партнера.

Компания Consumers Energy произвела замену изношенных уплотнительных колец на 15-ти компрессорах, сэкономив в итоге около \$21 000 на сокращении утечек газа в объеме 7 000 фут.³/год (196 м³/год) и цены на газ \$3,00/тыс. фут.³ (\$106/ тыс. м³). Затраты на замену всех сальников, включая материалы и работу, составили \$17 000 и окупались менее чем за год.

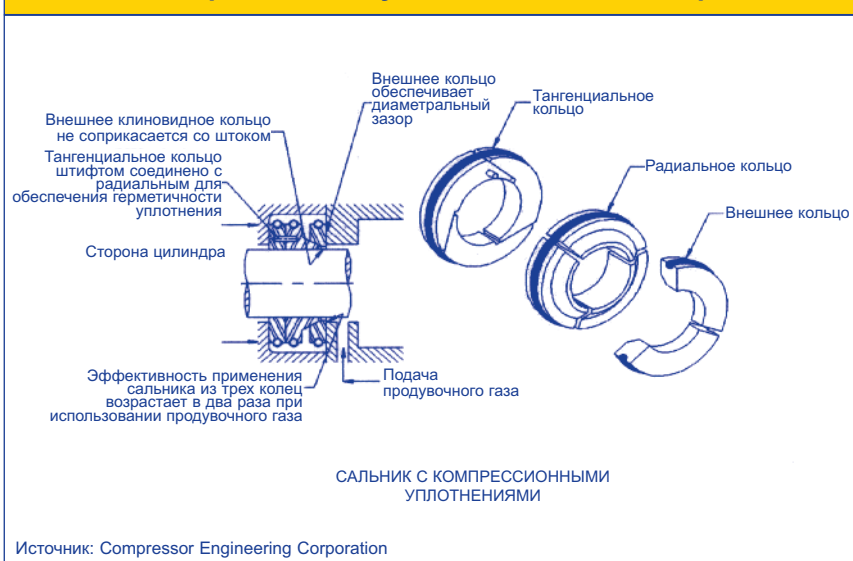
Дополнительные возможности

Партнеры программы Natural Gas STAR не достигли соглашения по стандарту сокращения эмиссии при замене уплотнений компрессорного штока. Слишком многие факторы влияют на потенциальный экономический эффект, включая давление в цилиндре, подгонку и центровку уплотнительных элементов, степень износа штока и колец, так же, как и принятые самими компаниями критерии оценки. Однако, партнеры едины во мнении, что определение величины "порога замены" уплотнительных колец и поршневых штоков является реальным способом сокращения эмиссии метана в поршневых компрессорах.

Новые материалы могут продлить срок эксплуатации и эффективность некоторых видов оборудования, а также создать дополнительную экономию за счет сокращения утечек стоимости ремонта и замены.

- ★ **Варианты замены колец.** Углеродосодержащие тефлоновые кольца постепенно вытесняют бронзовые. Один из производителей утверждает, что почти при одной цене, тефлоновые кольца будут служить примерно на год дольше обычных бронзовых. Однако и другие факторы, такие как правильная установка, охлаждение, смазка, могут оказывать большое влияние на срок эксплуатации колец.
- ★ **Улучшение качества поршневых штоков.** Известно, что новые или существующие компрессорные штоки, покрытые карбидом вольфрама, служат дольше за счет уменьшения износа, а также за счет укрепления неподвижного соединения (см. отчет "Снижение эмиссии метана при отключении компрессоров" из серии "Опыт Применения"). Покрытие карбидом вольфрама обходится дополнительно в \$1 000 - \$2 000. Хромирование также применяется для уменьшения истирания штока.
- ★ **Трехкольцевое уплотнение.** Трехкольцевое уплотнение, показанное на рис. 5, становится все более распространенным. Оно устанавливается, как правило, в одной из двух последних кювет. Основное преимущество такого подхода состоит в том, что установку можно произвести без замены или переустройства сальниковой камеры.

Рис. 5: Компрессионное уплотнение штока из трех колец



Опыт применения

Партнеры пришли к выводу, что обучение персонала простейшим методам экономически эффективной замены компрессорных поршневых штоков и уплотнительных колец существенно сокращает эмиссию метана. Получаемая экономия газа обеспечивает окупаемость более частых замен.

Основные выводы.

- ★ Создайте систему регулярных замеров и мониторинга утечек через сальник поршневого штока. Регулярно проверяйте смазку и охлаждение уплотнительных колец для снижения их износа. При высоких рабочих температурах низкий коэффициент теплопроводности колец может стать существенным фактором их разрушения.
- ★ Установите базовые показатели уровня утечек (IL) новых сальников и штоков для различных условий работы компрессоров.
- ★ Передайте данные по базовым показателям исходных утечек на другие станции, так как такие данные могут быть не на всех станциях.
- ★ Установите для специфических производств порог рентабельности замены для каждого компрессора, чтобы всегда знать, когда наиболее выгодно заменить уплотнительные кольца и поршневой шток.
- ★ Установите поршневые штоки улучшенных модификаций, если это оправдано экономически. Такая замена существенно снизит эмиссию в течение срока службы штока.
- ★ Новые материалы для уплотнительных колец и новые системы сальников становятся доступными и чаще применяются тогда, когда стоимость конечного продукта и экологические факторы оправдывают повышение затрат.

Литература

- ★ Дополнительную информацию можно получить из отчета "Снижение эмиссии метана при отключении компрессоров" серии "Опыт применения".
- ★ Включайте данные по сокращению эмиссии метана при замене уплотнительных колец и штоков в ежегодные отчеты по программе Natural Gas STAR.

Alastair J. Campbell, Bently Nevada Corporation, Houston, Texas. *Optical Alignment of Reciprocating Compressors*.

Borders, Robert, C. Lee Cook, Louisville, Kentucky, personal contact.

France Compressor Products. *Mechanical Packing—Design and Theory of Operation, Bulletin 691*.

Miniot, Joe, Compressor Engineering Corporation, Houston, Texas, personal contact.

Parr, Robert, TF Hudgins, Houston, Texas, personal contact.

Pipeline & Gas Journal, "Compressor Shutdown Leakage," December 1985.

Pipeline Research Committee International, *Cost-Effective Leak Mitigation at Natural Gas Transmission Compressor Stations*, PR-246-9526, August 1999.

Schroeder, David M., France Compressor Products, Newtown, Pennsylvania, personal contact.

Tingley, Kevin, U.S. EPA Natural Gas STAR Program, personal contact.



United States
Environmental Protection Agency
Air and Radiation (6202J)
1200 Pennsylvania Ave., NW
Washington, DC 20460

EPA430-B-04-001
Июль 2003 г.